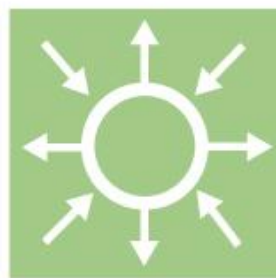




Inventering av framtidens el- och värmeproduktionstekniker

Delrapport Kärnkraft

Elforsk rapport 08:80



Anders Wik

December 2008

ELFORSK

Inventering av framtidens el- och värmeproduktionstekniker

Delrapport Kärnkraft

Elforsk rapport 08:80

Förord

Fokus för hela projektet avseende inventering av framtidens produktionstekniker för el- och värmeproduktion har varit framtida möjlig utveckling av olika produktionstekniker för kraft- och värmeproduktion med bedömning av prestanda samt när en eventuell implementering och kommersialisering kan vara möjlig. Att kunna göra en sådan bedömning är av största vikt för att kunna planera inför kommande förändringar och investeringar och när dessa kan komma, men också för att kunna sätta in de FoU-resurser som erfordras.

Projektet har genomförts som olika deluppdrag inom de olika produktionsområdena med föreliggande rapport avseende delrapport Kärnkraft. Anders Wik, Vattenfall Research and Development, har varit projektledare för delstudien. Alla övriga delrapporter inom projektet samt en syntesrapport återfinns för nedladdning på Elforsks hemsida www.elforsk.se.

Projektet har finansierats av AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad, E.ON Värmekraft AB, Jämtkraft AB, Krafteringen Produktion AB, Mälarenergi AB, Skellefteå Kraft AB, Umeå Energi AB, Vattenfall AB, Öresundskraft AB samt av Statens Energimyndighet.

Projektet har följts av en styrgrupp bestående av Björn Fredriksson Möller och Mikael Palmgren E.ON Värmekraft, Sten Grahn Fortum Värme, Anders Johansson och Svante Söderholm Statens Energimyndighet, Maria Jonsson och Leif Liinanki Vattenfall Research and Development, Ulf Lindqvist Jämtkraft, Magnus Stenvall Umeå Energi samt Lars Wrangensten Elforsk.

Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och uppslag.

Lars Wrangensten
Elforsk AB
Programområde El- och Värmeproduktion
December 2008

Sammanfattning

Denna delrapport inom uppdraget "Inventering av framtidens produktions-tekniker för el och fjärrvärme" belyser kärnkraften. Följande områden behandlas i rapporten; kärnkraft i Sverige och i Europa, ekonomiska och miljömässiga aspekter på kärnkraft och frågor som rör kärnkraftens framtid, till exempel, utbyggnad idag, forskning och utveckling och scenarion bortom 2020.

Slutsatsen är att kärnkraft har en nyckelroll i det energisamhälle vi lever i idag och det som kommer att göra det fortsättningsvis de närmaste decennierna. Kärnkraften passar bra in i några av de viktigaste energimålen för EU; säker tillgång på elektricitet, minskning av klimatpåverkande gaser och konkurrenskraftig elproduktion. Det stora intresse som finns för kärnkraft idag baseras på detta att kärnkraften kan ses som ett av de få kommersiellt intressanta och tillgängliga alternativen.

Inom den närmaste framtiden så satsas stora FoU-medel på livslängdsförlängning, att få de befintliga anläggningarna att producera el längre än de ursprungligen var tänkta att göra. I det längre perspektivet siktar forskningsinsatserna på att ta fram ett uthålligt kärnkraftssystem. Detta innefattar stora FoU-insatser inom material- och bränsleteknik, uppbyggnadsteknik, bryderreaktorer och kanske också transmutation.

Summary

This report is a subproject of the project "Energy system feasibility study – Future concepts for heat- and power production" regarding nuclear power. The following topics are covered; nuclear power of today in Sweden and Europe, the environmental and economic aspects of nuclear power, development and R&D of nuclear power and the sustainability of nuclear power.

The conclusions are that nuclear power has an important role to play in terms of the objectives of EU regarding energy viz, Security of Supply, Competitiveness and reduction of Greenhouse Gas Emissions. In terms of economy, nuclear power is one of the most attractive options that are available on the market today. This is manifested by the great activity in the market the last years leading to a number of nuclear projects in Europe and elsewhere.

In the near future the R&D efforts are dominated by means of life extension of the existing nuclear fleet. In a longer perspective the R&D programs are heading towards a sustainable nuclear energy society. This includes research areas in materials engineering, reprocessing technologies, fast breeder reactors and, possibly, transmutation.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Kärnkraft i Sverige	2
3	Kärnkraft i Europa	4
4	Etableringströsklar för kärnkraft	6
5	Kärnkraftens ekonomi och miljöpåverkan	7
6	Kärnkraftens tekniska utveckling	11
7	FoU inom kärnkraft	16
8	Framtida uthålligt kärnkraftssamhälle	19
9	Referenser	24

1 Inledning

Europa, liksom resten av världen, står inför stora utmaningar när utsläppen av växthusgaser skall reduceras. Största bidraget av växthusgaser kommer från koldioxid och den sektor som släpper ut den största mängden koldioxid är kraftbolagen. Det är därför naturligt att EU inriktar sig på att försöka få en ändring till stånd inom kraftindustrin. Detta har stadfästs i det EU-direktiv som gäller för energipolitiken inom unionen, där det bland annat står att EU skall fram till 2020 reducera utsläppen av växthusgaser med 20% och öka andelen förnybar energi till 20%.

EU:s klimatmål skall också fungera tillsammans med två andra viktiga intentioner, säker tillgång till elektricitet (security of supply) och konkurrenskraftig produktion enligt Lissabonfördraget. Detta kan sammanfattas i dessa tre punkter:

- Säker tillgång på elektricitet (Security of Supply)
- Minskning av klimatpåverkande gaser (Reduction of Greenhouse Gases)
- Konkurrenskraftig produktion (Competitiveness)

I ljuset av detta skall det nyvaknade intresset för ny kärnkraft i Europa ses. För att intensifiera ansträngningarna inom kärnkraft på alla plan (tekniskt, ekonomiskt, politiskt etc) så har det bildats en plattform inom EU kallad SNETP, "Sustainable Nuclear Energy Technology Platform", med många intressenter från forskningsinstitutioner, kraftbolag, tillverkare och andra. Vid lanseringen hösten 2007 av SNETP höll EU:s energikommisionär A Piebalgs ett anförande där han betonade kärnkraftens viktiga roll i det europeiska energisystemet [1]. Han uttalade också en tro på att kärnkraften kommer att vara ett betydelsefullt energislag i EU i framtiden.

2 Kärnkraft i Sverige

Efter det att vattenkraften i Sverige ansågs vara färdigutbyggd startade kärnkraftseran. Efter ett antal försöksreaktorer på 50-talet byggdes Sveriges första reaktor som fasades in på nätet, Ågestareaktorn i Stockholms södra förorter. Ågesta var en tungvattenmodererad reaktor som drevs med naturligt uran. Effekten var på 12 MWe och till detta genererades fjärrvärme till Farsta. Ågestareaktorn var en del i den så kallade "svenska linjen" och kan sägas representera Gen I. Ågestareaktorn var i drift under åren 1964-1974.

Den svenska kärnkraftslinjen lades ner efter det misslyckade Marviken-projektet och de svenska kraftbolagen satsade på de kommersiella lättvattenreaktorerna av amerikansk typ som hade tagits fram av General Electric (BWR) och Westinghouse (PWR). I Sverige så tog ASEA-ATOM (se figur 1) fram en egen reaktortyp baserad på General Electrics BWR. Detta blev startpunkten för ett stort utbyggnadsprogram med tolv reaktorer som startade, och slutade, i Simpevarp utanför Oskarshamn. Den första reaktorn, O1, hade en effekt på 440 MWe och den sista, O3 på 1160 MWe. Sverige har idag tio reaktorer i drift, sju stycken BWR (alla levererade av ASEA-ATOM) och tre stycken PWR levererade av Westinghouse. Samtliga dessa reaktorer brukar betecknas att vara av typen Gen II även om F3 och O3 kan betraktas vara avancerade Gen II med en högre grad av diversifiering och redundans. Av de ursprungliga tolv är de två reaktorerna i Barsebäck nu nedlagda.



Figur 1. Forsmark 1 och 2.

Sedan ett par decennier baseras den svenska elförsörjningen av vattenkraft och kärnkraft med ungefär 50% av vardera kraftslaget. Behovet av ny krafttillförsel har varit litet under denna tid. Endast mindre anläggningar, framför allt biobränslebaserad kraftvärme och vindkraft, har tagits i bruk. Under de senaste åren har också några naturgaskombianläggningar byggts.

Både vattenkraften och kärnkraften genomgår nu stora reinvesteringsprogram. För kärnkraftens del innebär det också en effektutbyggnad, samtliga anläggningar har projekterat för en effekthöjning jämfört med den ursprungliga effekten. Effekthöjningsprojekten är motsvarande minst en reaktor i Barsebäck, som mest kan effekthöjningen motsvara båda reaktorerna i Barsebäck. Idag så genomförs åtgärder i reaktorparken för att möta en förväntad livslängd på minst 50 år. Detta är idag ekonomiskt ett mycket intressant för elproduktion i jämförelse med andra till buds stående alternativ.

Sammanfattningsvis kan man säga följande om kärnkraften i Sverige idag:

- Kärnkraften står idag för ca 50% av elproduktionen i Sverige. Även 2020 kommer kärnkraften att stå för ca hälften av elen.
- Tio reaktorer i drift idag och troligen även 2020 då livslängdförlängning planeras av kraftbolagen på samtliga befintliga verk, 50 år och mer.
- Effekthöjningsprojekt pågår i alla kärnkraftverk. I Svensk Energis scenario beräknas effekthöjningen ge 8 TWh år 2020.

3 Kärnkraft i Europa

Kärnkraft står idag för 1/6 av världens elförsörjning, ett förhållande som också gäller för Europa [2]. I Europa finns idag 193 reaktorer i drift, spridningen är dock stor, vissa länder har en stor andel kärnkraft, t ex Frankrike och Sverige, medan andra länder inte har någon kärnkraft alls. Ett axplock av några stora kärnkraftsländer visas nedan:

- Frankrike 59 st (78% av elproduktionen)
- Ryssland 31 st (16% av elproduktionen)
- Storbritannien 19 st (18% av elproduktionen)
- Tyskland 17 st (32% av elproduktionen)

Tittar vi hur det ser ut med kärnkraftens framtid i Europa så är det en splittrad bild som tonar fram. Det finns starka åsikter för och emot kärnkraft i de nationella parlamenten [3]. En fördelning av pro- och antikärnkraft kan se ut så här:

- **Pro:** Frankrike, Ryssland, Finland, Litauen, Rumänien m fl
- **Anti:** Tyskland, Österrike, Italien (?), Danmark, Belgien (?) m fl

Man skall dock vara medveten om att detta kan svänga mycket fort. Frågetecknen för Belgien och Italien är ett uttryck för en sådan svängning där den nya regeringen i Italien signalerar att de skall bygga nya kärnkraftverk. Bilden kompliceras ytterligare om man tar hänsyn till vad olika opinionsundersökningar om kärnkraft ger för svar. Där kan det visa sig i vissa fall att det danska folket är mer positiva till kärnkraft som ett medel till att minska koldioxiden än det franska folket [4].

De kärnkraftverk som byggs idag är så gott som uteslutande Gen III reaktorer (för närmare beskrivning av generationsbegreppet, se nästa kapitel). Dessa representerar en evolutionär utveckling av Gen II så det är inga gigantiska tekniksprång i dessa fall. När det gäller Gen IV finns det några som skall byggas men för närvarande finns det inget påbörjat byggprojekt. Detta betyder att det finns ett gap mellan Gen III, som vi kan betrakta som kommersiell, och Gen IV, som med största sannolikhet inte kommer att bli kommersiellt tillgänglig under den period vi tittar på i denna rapport.

För reaktorleverantörerna gäller det att få några beställningar på de Gen III modeller de har investerat mycket pengar och ingenjörstimmar på att ta fram. Det finns redan några Gen III anläggningar i drift i Japan av typen ABWR (leverantör Toshiba/Hitachi) som har varit i drift ett antal år. I Europa har Areva två byggprojekt på gång, dels Olkiluoto 3 i Finland och dels Flamanville 3 i Frankrike. Westinghouse tryckvattenreaktor av Gen III typ, kallad AP1000, har offererats och upphandlats av Kina (två stycken) och USA (fyra stycken), däremot har inte byggerna påbörjats ännu. General Electric har ännu inte sålt någon av sin ESBWR som är deras Gen III, dock pågår förhandlingar med kraftbolag i USA och Europa.

Många av kraftbolagen tvekar inför att vara först på kölistan för att köpa nya kraftverk då det finns osäkerhet på leveransförmågan. Detta har visat sig när det gäller Finland 5 (Olkiluoto 3) där byggprojektet har drabbats av stora förseningar, upp emot två år. Av den anledningen känns det lättare att vara nummer två som skall få en reaktor levererad då man kan hoppas på att barnsjukdomarna skall vara lösta.

4 Etableringströsklar för kärnkraft

Kärnkraft har en del specifika egenskaper som skiljer ut den från andra elproduktionstekniker. Den största skillnaden är hanteringen av klyvbart material som måste kontrolleras och övervakas av IAEA, detta på grund av risken för spridning av radioaktiva ämnen. Det värsta scenariot är att tillräckligt stora mängder klyvbart material för att tillverka kärnvapen kommer på avvägar, men även riskerna med att utnyttja radioaktivt material i så kallade "smutsiga bomber" och annan, mer oavsiktlig spridning, gör att en strikt övervakning av kärnkraftsbranschen är nödvändig.

Ur ett mer normalt kraftindustriellt perspektiv så finns det några viktiga egenskaper hos kärnkraft. Den kärnkraft som planeras och byggs idag är av Gen III typ och är stora enheter, >1000 MWe, vilket gör investeringarna mycket stora. Själva komplexiteten i att projektera, upphandla, bygga och driva ett kärnkraftverk utgör i sig en stor tröskel. Endast stora kraftbolag med erfarenhet av kärnkraft sedan tidigare är tänkbara aktörer inom framtida kärnkraft i Europa. För att öka kunskapen om uppförandet av nya kärnkraftverk har 15 stycken europeiska kraftbolag gått samman och bildat EUR, European Utility Requirements. Detta är de kravspecifikationer som ligger till grund för nyupphandlingarna av Finland 5 och den nya reaktorn i Flamanville, Frankrike.

Att bygga ett kärnkraftverk är en lång process jämfört med många av de alternativ som finns kommersiellt tillgängliga. Detta kopplat till den stora investeringskostnaden gör kärnkraften "framtung", dvs det tar lång tid innan kassaflödet vänder. Tiden från ett beslut att bygga ett kärnkraftverk tills det att den kopplas in på elnätet kan vara så lång som 12-15 år. Innan bygget kan komma igång så krävs att få alla tillstånd klara samt projektering och upphandling. För Finland 5 (OL3) så beräknades byggtiden till drygt fem år men detta har reviderats till ca sju år, en försening som delvis förklaras med att det inte byggts något verk på mycket länge i vår del av världen. Se figur 2.



Figur 2. Ursprunglig tidplan för Finland 5 (OL3)

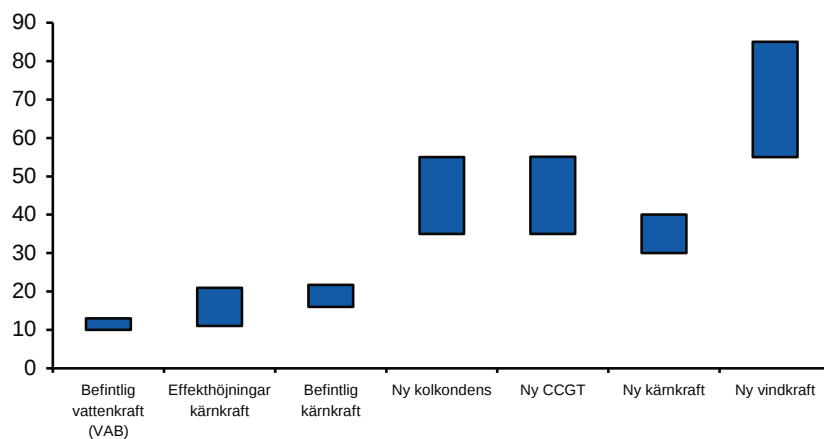
5 Kärnkraftens ekonomi och miljöpåverkan

Kärnkraftens lönsamhet är ett ämne som debatterats i svenska media under flera decennier. De som inte anser att kärnkraft är ekonomiskt försvarbart brukar ofta anföra att kärnkraften ej står för sina försäkringskostnader fullt ut vid olyckor eller allvarliga händelser. Många kraftbolag anser dock att kärnkraft är ett ekonomiskt intressant alternativ, även för nya anläggningar.

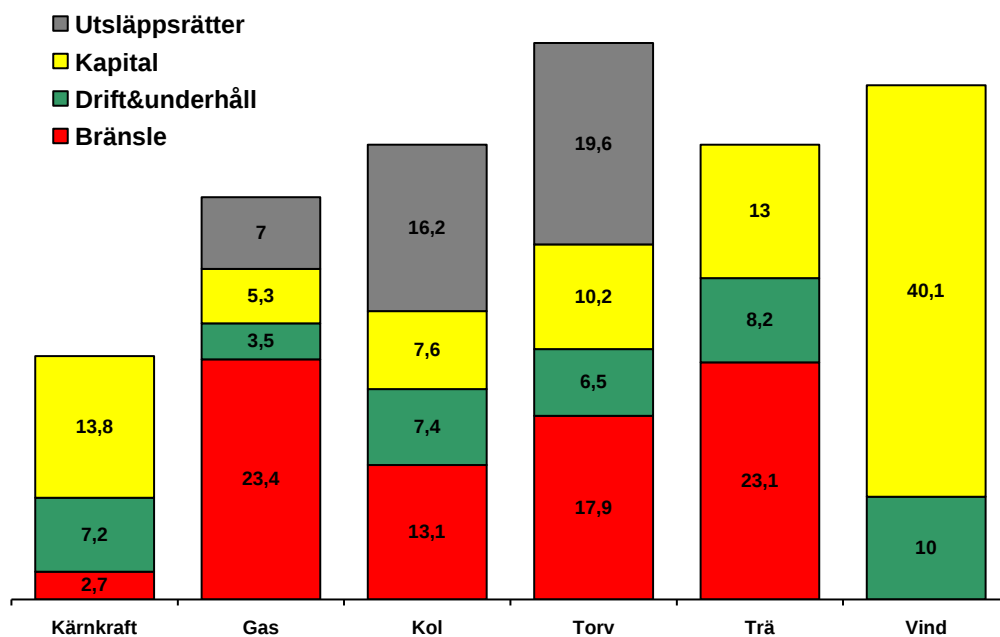
Elforsks rapport 07:50 "El från nya anläggningar 2007" ger elproduktionskostnader för ett antal olika tekniker där bland annat kärnkraft ingår. Vid en kalkylränta på 6% och utan skatter och bidrag så ligger produktionskostnaden för 1600 MWe kärnkraft på ca 27 öre/kWh vilket tillsammans med ny vattenkraft är det billigaste elproduktionsalternativet. Tar man med skatter, avgift och bidrag så stiger kostnaden till ca 44 öre/kWh vid 12% kalkylränta [5]. I detta fall blir vattenkraftens produktionskostnad ca 2/3 av kärnkraftens men kärnkraft är det näst billigaste alternativet och ger en lägre kostnad än övriga kraftslag som vindkraft, biobränsle-KVV, Avfalls-KVV, gaskombi etc.

Andra studier som gjorts visar också på att kärnkraft är ett attraktivt alternativ vid nybyggnation av elproduktionsanläggningar. Vattenfall anger intervallet 30-40 öre/kWh [6]. Se figur 3. Lägst kostnad ger TVO som inför investeringen av Finland låg på ca 23 öre/kWh [7]. Se figur 4. Ytterligare andra studier ligger i storleksordning 30 öre/kWh vilket kan anses som en siffra som kommer från de flera länder. Det finns vissa skillnader, kostnader för ny kärnkraft i USA och Japan ligger oftast högre än rapporterade kostnader i Europa [8]. Den försvagning som den amerikanska dollarn har genomgått de senaste åren gör dock att de amerikanska siffrorna sjunkit något i jämförelse med euro och svenska kronan.

€/MWh



Figur 3. Beräknade elproduktionskostnader för olika kraftslag. [6]



Figur 4. Beräknade elproduktionskostnader €/MWh framtagna i samband med Finland 5.[7]

Den siffra för ny kärnkraft som är låg jämfört med andra är den finska studien. Denna studie har fått stor spridning och citeras ofta internationellt och kan därmed ge en lite väl optimistisk lönsamhetskalkyl för ny kärnkraft.

Investeringskostnaden för ett nytt kärnkraftverk är inte lika lätt att finna i litteraturen. TVO hävdar att prislappen för EPR-investeringen Finland 5 är ca 30 000 MSEK [9]. Vad kostnaden för reaktorleverantören Areva landar på är däremot inte känt. I USA hävdar många kraftbolag 3000 \$/kWh vilket är i samma storleksordning som för Finland 5. Dock pekar flera amerikansk bedömare på att dessa kostnader är ett par år gamla och att priserna på stål har ökat mycket kraftigt. Detta kan medföra att kostnaderna för ny kärnkraft betydligt högre [8].

Produktionskostnaderna för Gen IV anläggningar är betydligt svårare att göra, dels därför att de inte kan anses vara fullt kommersiella i dagsläget och dels för att tillgången på ekonomiska data för demoanläggningarna är begränsade. Den reaktortyp som har mest drifterfarenhet är SFR, den natriumkylda snabbreaktorn där det finns längre drifterfarenheter från Frankrike (Phénix) och Ryssland (BN-600). Ryssarna anger att kostnaderna per kWh är ca dubbelt så stor för deras SFR jämfört med lättvattenreaktorerna. Fransmännen hävdar att en framtida SFR skulle ha ca 20% högre elproduktionskostnader jämfört med en EPR [10].

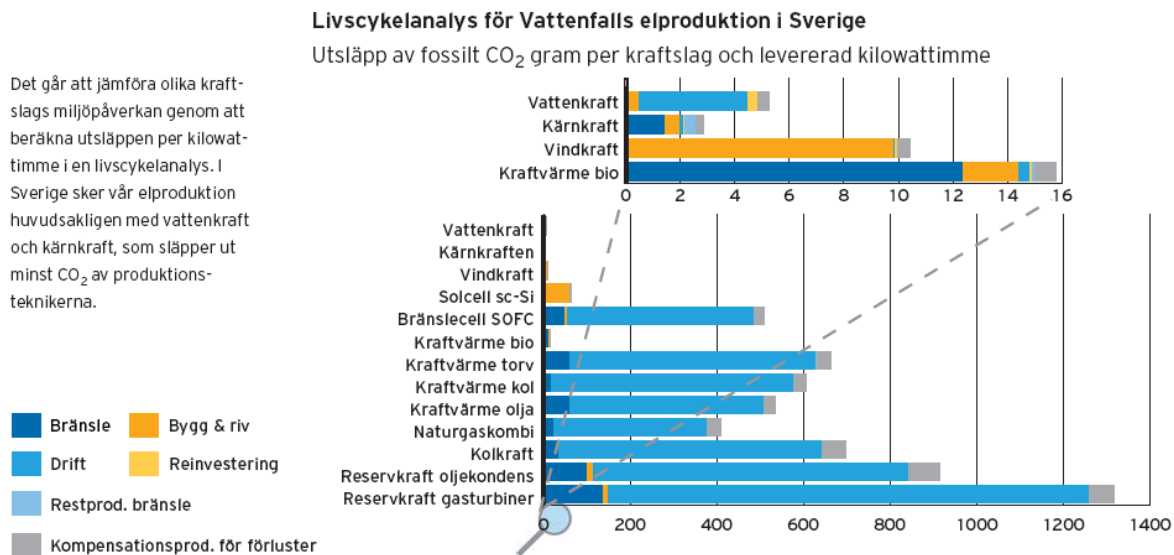
En allmän uppfattning är att det inte är lönsamt med "stand alone" Gen IV reaktorer ur ett strikt företagsekonomiskt perspektiv, de måste sättas in i ett sammanhang med upparbetning och bridning i ett långsiktigt uthålligt kärnkraftssystem. Med sådana tankegångar så får man uranresurserna att räcka längre och kan dessutom ta toriumtillgångar i bruk om det vore önskvärt. Med en reaktorpark bestående av Gen II och Gen III som huvudsakliga elproduktionsanläggningar, med upparbetning och Gen IV för att sluta bränslecykeln så kan de kända urantillgångarna räcka betydligt längre, troligen flera tusen år, jämfört med det hundratal år som man räknar med idag.

Även kärnkraftens miljöpåverkan när det gäller växthusgaser har debatterats i media. Det finns uppgifter i insändare och liknande som hävdar att kärnkraften har nästan lika stora utsläpp av koldioxid som kolkraft. Ibland citeras Greenpeace men i denna delstudie har inga Greenpeacerapporter hittats som stöder detta uttalande.

De mer utförliga studier som gjorts inom området visar dock att kärnkraften har mycket små utsläpp av växthusgaser. De siffror som kan hittas ligger i spannet 3-40 g CO₂/kWh vilket kan jämföras med en naturgaseldad kombicycle med hög elverkningsgrad som har ca 400 g CO₂/kWh [11]. Det betyder alltså att gaskombianläggningar, som Greenpeace kan tänka sig som en brygga mot ett uthålligt energisystem, släpper ut minst tio gånger så mycket koldioxid per producerad kilowattimme jämfört med kärnkraft.

Vattenfall har gjort en livscykelanalys för olika kraftslag där kärnkraften ligger i det lägsta spannet, ca 3 g CO₂/kWh [12]. Se figur 5.

Siffrorna som redovisas ovan baseras på ett livscykelperspektiv, dvs hela kedjan ingår, från uranbrytning, över anrikning och bränsletillverkning, till slutförvar.



Figur 5. Livscykelanalys för olika kraftslag

6 Kärnkraftens tekniska utveckling

Kärnkraften har, likt många andra kraftslag, stegvis gått från de första små prototyperna (ofta benämnda Gen I) på 50-talet till dagens stora kraftverk med en elektrisk effekt på 1000-1800 MWe. Figur 6 visar hur utvecklingen inom kärnkraft har varit [13]. Utifrån en ganska stor variation av reaktorkoncept, inkl. snabbreaktorer, så utkristalliserades en linje som blev helt förhärskande, nämligen lättvattenreaktorer. Dessa utnyttjar ett termiskt neutronspektrum där vanligt avsaltat vatten står för modereringen. Lättvattenreaktorerna utvecklades i två varianter tryckvattenreaktorer (PWR) och kokvattenreaktorer (BWR) och utgör stommen i det som idag kallas Gen II. PWR är den dominerande varianten i världen men båda teknikerna utvecklas vidare och finns idag som Gen III reaktorer. Lättvattenreaktorerna utvecklades från tämligen moderata effekter till dagens storlek.

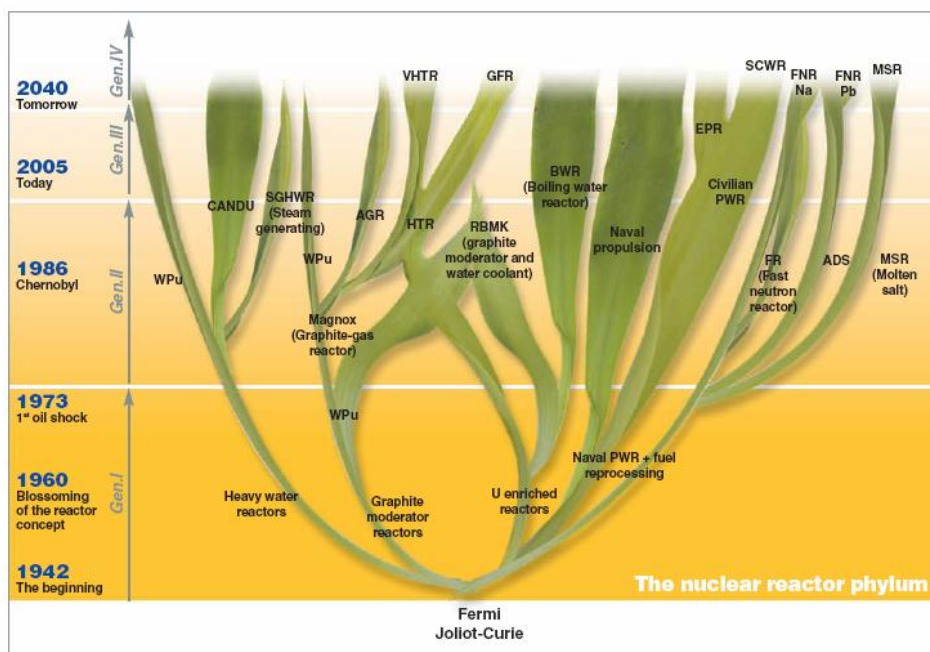


Fig. 88. The phylogenetic tree of nuclear reactors.

Brief description of the main branches of the tree: reactors may operate with natural uranium or enriched uranium, but the use of natural uranium restricts the choice of coolants to graphite and heavy water. The use of enriched U offers almost all possible choices of coolants and moderators. Some combinations are more fortunate than others: the water coolant has had a lot of success, because it is also a good moderator. Water reactors (PWR and BWR) constitute most of the contingency of generations II (current) and III (near future) reactors.

The combination of a graphite moderator and a gas coolant paves the way to high temperature reactors.

The branches of fast neutron reactors are still little developed. Only certain species of nuclear reactor have survived. Some branches are extinct or in the process of becoming extinct: NUGGs for economic competitiveness reasons, RBMKs for safety reasons.

But the selection criteria are changing, the world is evolving. Other species are emerging. The six concepts retained by the Gen IV are at the top of the tree. Will they all be developed?

- WPU: Military plutonigenous reactor.
- SGHWR: Heavy water reactors supplying industrial heat (Steam Generating Heavy Water Reactor).
- AGR: Graphite-gas reactors (Advanced Gas-cooled Reactor).
- (V)HTR: (Very) High Temperature Reactor.
- SCWR: Super Critical Water Reactor.
- ADS: Hybrid spallation-fission system (Accelerator-Driven System).
- FR: Fast Reactor.
- MSR: (Molten Salt Reactor).

Figur 6 Utvecklingen av olika kärnkraftskoncept

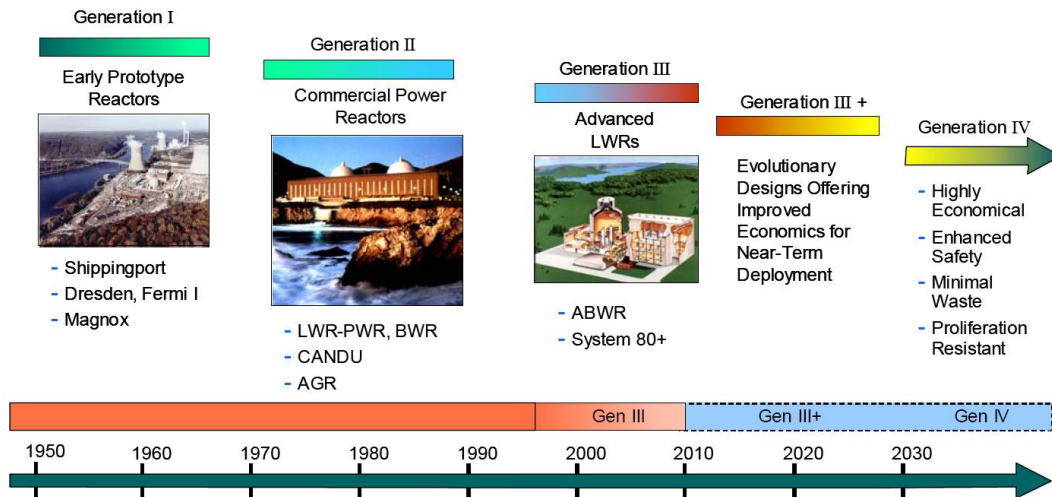
Gen III brukar beskrivas som en evolutionär utveckling av Gen II. Detta innebär att de baseras på de gamla reaktortyperna men att man har arbetat mycket med reaktorsäkerheten. Det är framför allt sådant som en bättre separering av säkerhetssystem, ökad redundans och diversifiering. Dessutom skall de klara en härdsälta utan aktivitetsutsläpp till omgivningen. Även sådana händelser som tidigare inte ingick i säkerhetsanalysen försöker man nu beakta, t ex flygplanskrasch mot reaktorbyggnad. Inom kärnkraftsvärlden talar man också om Gen III+. Tanken med Gen III+ är att säkerhetslösningarna inte skall kräva så mycket aktiva säkerhetssystem utan mer förlita sig passiva lösningar. Idag finns ingen reaktor av denna typ i drift.

Trenden har gått mot allt större reaktorer, idag kan man beställa reaktorer på 1800 MWe. Detta ger generellt en lägre specifik investeringskostnad, kr/kW. Det finns dock en baksida med dessa stora anläggningar, dels det kapital som binds upp under lång tid kopplat mot den osäkerhet som finns när det gäller den framtida prisbilden. En annan risk är det stora produktionsbortfall det blir när en sådan anläggning är ur drift ett längre tag. Detta skedde i Hamaoka 5 (1800 MWe) när en lågtrycksturbin havererade och anläggningen stod stilla i mer än ett halvår. I framtiden kan man sig ett större spann av reaktorstorlekar, det är inte nödvändigtvis så att effekterna skall bli större dagens. I vissa fall vill man hålla nere storleken av reaktorsäkerhetsskäl och vissa fall för att man vill ha mer flexibla kraftverk i energimixen.

Den kommande generationens kärnkraftverk, Gen IV, är på många sätt helt annorlunda konstruerade än Gen III [14]. Precis som i kärnkraftens barndom så finns det flera olika koncept och flera av dem fanns med på ritbordet redan för ett halvsekel sedan. De koncept som är föremål för intresse från Generation IV International Forum, GIF är:

- GFR Gas-Cooled Fast Reactor
- SFR Sodium-Cooled Fast Reactor
- LFR Lead-Cooled Fast Reactor
- VHTR Very High Temperature Reactor
- MSR Molten Salt Reactor
- SCWR Super Critical Water Reactor

Den bild som vanligen syns i samband med diskussioner om Gen IV är bilden i figur 7.

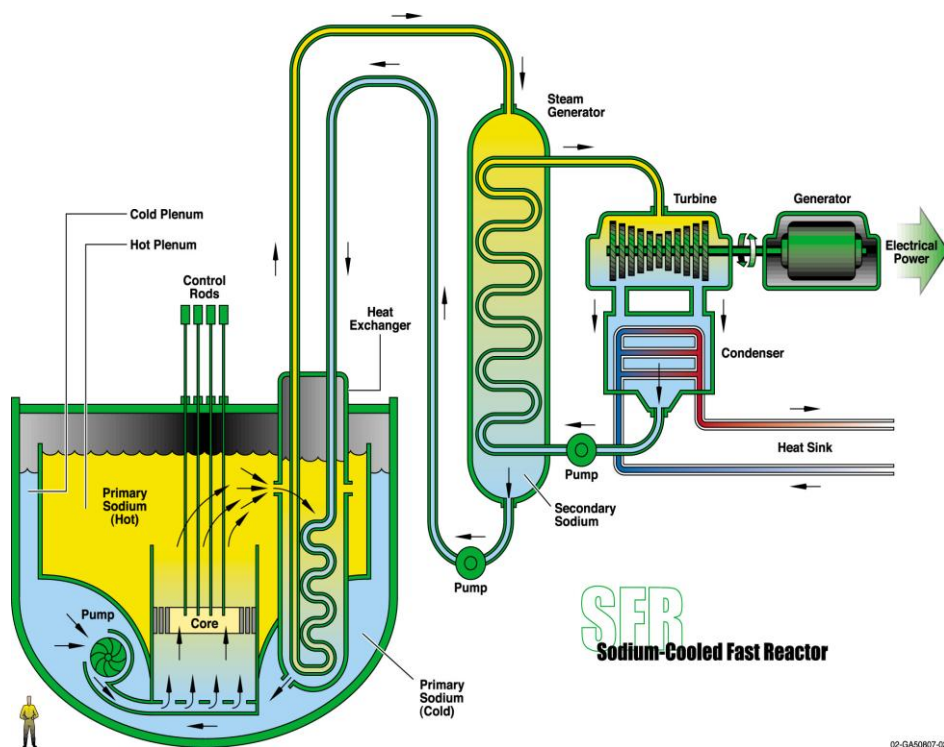


Figur 7. De olika kärnkraftsgenerationerna

Gen IV kan betecknas som en ny generation kärnkraftssystem som kan licensieras, byggas och drivas på ett sätt att de utgör en pålitlig energikälla till ett konkurrenskraftigt pris i det land där systemet utnyttjas, detta samtidigt som reaktorsäkerhets-, avfalls-, ickespridnings och opinionsfrågor beaktas.

Koncepten skiljer sig åt på flera punkter, de flesta är snabbreaktorer (vilket möjliggör en slutning av bränslecykeln) men inte VHTR. SCWR kan utföras både med öppen och sluten bränslecykel. De har också olika kylmedia, (vatten, gas, natrium etc) vilket innebär stora skillnader i bränsle- och materialkrav. För djupare beskrivning av koncepten, se www.gen-4.org.

För flera av dessa Gen IV-koncept finns drifterfarenheter från olika demonstrationsanläggningar och därmed en grund att stå på för vidare utveckling. Mest drifterfarenheter finns från natriumkylda snabbreaktorer, SFR. Sådana har funnits i drift i olika storlekar under relativt lång tid. Se figur 8.



Figur 8. SFR, natriumkyld snabbreaktor

Intresset för de olika koncepten varierar från land till land, klart är dock att Frankrike förordar SFR i första hand och det finns ett beslut taget på att en sådan demonstrationsreaktor skall byggas och stå klar 2020. När det gäller tidplanerna för koncepten avseende demonstrationsreaktorer så tror man att SFR och VHTR kan stå färdiga 2020, GFR och SCWR 2025 och slutligen LFR och MSR finns som demonstrationsanläggningar 2030. Målet med Gen IV är att utveckla framtida kärnkraftssystem som kan licensieras, konstrueras och drivas på ett sätt som fyller kraven från GIF.

Generation IV är fortfarande till största delen en FoU-fråga. Förutom de demonstrationsanläggningar som finns i drift redan idag så finns det ambitiösa planer inom Gen IV. Dessa frågor drivs framför allt av en särskild organisation som är skapad för detta ändamål, Generation IV International Forum, GIF. Förutom länderna i GIF så driver också Indien ett kärnkraftsprogram inom Gen IV där de bland annat bedriver FoU inom toriumområdet.

En intressant egenskap med Gen IV är den högre verkningsgraden som erhålls jämfört med tidigare kärnkraftverk. Verkningsgraden är givetvis alltid intressant men inte lika avgörande för kärnkraften som för konventionella ångkraftverk. Detta dels beroende på att bränslekostnaden är en relativt liten del av elproduktionskostnaden, typiskt 10-20 % och dels på att det inte finns

något alternativt användningsområde för uran. Den högre verkningsgraden möjliggör dock ett bättre utnyttjande av resurserna och en helt ny möjlighet att använda den höga temperaturen för andra tillämpningar, t ex vätgasproduktion eller avsaltning av havsvatten. Verkningsgraden för Gen IV jämfört med dagens reaktorer kan ses i tabellen nedan.

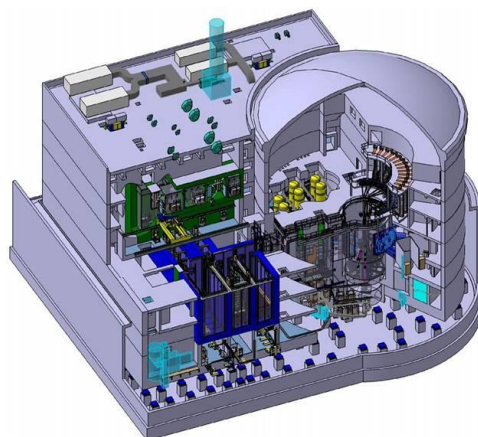
- **Gen II** (t ex Ringhals 2) ca 34%
- **Gen III** (t ex Finland 5) ca 37%
- **Gen IV**
 - **GFR** ca 48%
 - **SFR** ca 45%
 - **MSR** ca 45%
 - **VHTR** ca 50%
 - **LFR** ca 40%
 - **SCWR** ca 45%

7 FoU inom kärnkraft

Efter andra världskriget så påbörjades forskning och utveckling för civila ändamål av kärnkraft, i USA talade president Eisenhower om "Atoms for Peace". I många länder togs det fram nationella FoU-program och det var flera koncept som bearbetades. I Sverige skedde mycket av forskningen på Studsvik under denna tid. Sammanhållande för merparten av arbetet var AB Atomenergi. Tidigt insågs behovet av reaktorsäkerhet och barriärprincipen etablerades med förebild från den amerikanska flottan. Även begrepp som redundans och diversifiering fanns med från allra första början. Det var just bristen på reaktorsäkerhet som stoppade den svenska tungvattenlinjen med Marvikenprojektet.

Efter olyckan på Three Mile Island (Harrisburg) och den ännu allvarigare Tjernobylolyckan så avstannade kärnkraftsutvecklingen i många länder, däribland Sverige. De senaste årens nymornade intresse har medfört att flera länder satsar på kärnkraft igen. Under de senaste decennierna har dock mycket av industrin nedrustats och det krävs satsning på bland annat ny infrastruktur i form av forskningsreaktorer. Av den anledningen så har ett beslut tagits om att bygga en ny forskningsreaktor i Cadarache, Frankrike kallad Jules Horowitz, JHR, som skall stå klar 2014. Se figur 9.

Den termiska effekten i JHR blir 100 MW vilket gör den till den största försöksreaktor i Europa. Denna forskningsreaktor kommer att vara en viktig pusselbit för materialtester och bränsleutveckling då flera av dagens forskningsreaktorer är ålderstigna. Svensk kraftindustri deltar idag i forskningsarbete i OECD reaktorn i Halden, Norge. Denna reaktor kommer att vara i fortsatt drift ytterligare ett antal år efter att ha fått förlängt tillstånd 2007.



Figur 9. Jules Horowitz, försöksreaktor i Cadarache.

Inom EU, genom Euratom, bedrivs mycket av forskningen inom ramprogrammen som nu är inne på det sjunde ramprogrammet, FP7.

Programmen är omfattande och från svensk sida är det mest högskolor som deltar. Svensk kraftindustri deltar i ett projekt kallat Nulife som är ett nätverksbyggande projekt. Den nybildade tekniska plattformen SNETP förväntas utgöra en mötespunkt för industrin och forskningsvärlden där de stora linjerna inom kärnkraftsforskning skall utformas. I det som kallas Strategic Research Agenda inom SNETP kommer mycket av framtida FoU initieras. SNETP har inga egna FoU-medel men kommer att lägga förslag till de existerande och kommande ramprogrammen. Givetvis kommer de enskilda länderna ha egna agendor men vi kan räkna med att det blir ett diskussionsforum för insatserna inom t ex Gen IV.

En fråga som kan bli föremål för livlig debatt är upparbetning. Idag sker upparbetning i Frankrike och Storbritannien inom EU medan de flesta andra länder har lagt ned alla planer på detta. Upparbetning ingår dock som en nyckelteknik i Gen IV om man skall få bränsleresurserna att räcka längre. Förslag finns också om att låta några få betrodda och politiskt stabila länder ta hand om upparbetningen för att på så vis kunna minska risken för spridning av klyvbart material. Se vidare kapitel "Framtida uthålligt kärnkraftssamhälle".

Ett annat initiativ, som bl a har tagits i Norge, för att öka tillgången på kärnbränsle är att utnyttja torium (Th) som reaktorbränsle. Genom att använda Th så skulle den befintliga reaktorparken kunna drivas längre utan att uranet tar slut. För att detta skulle fungera långsiktigt så behöver man utnyttja upparbetning och sluta bränslecykeln. Detta förutsätter en förändrad processkemi i upparbetningen. Idag är Indien det land som är mest aktivt inom detta område beroende på att de tidigare har varit avskurna från uranmarknaden pga att de inte ratificerat icke-spridningsavtalet. Torium har använts tidigare under 70- och 80-talet i gaskylda prototypreaktorer i Tyskland och USA.

Många länder i EU har nationella FoU-program som helt eller delvis integreras med EU-programmen. I EU är Frankrike det land som satsar mest på kärnkraftsforskning. FoU bedrivs ofta med CEA som huvudman men där kraftbolaget EdF och reaktorleverantören Areva deltar i ett nära samarbete. I Finland bedrivs mycket av forskningen på VTT, som snarast har en ställning som motsvarar Studsviks gamla roll. I Nordiska rådets regi inom NKS (Nordisk kärnsäkerhetsforskning) bedrivs en mindre FoU-verksamhet inom reaktorsäkerhetsområdet.

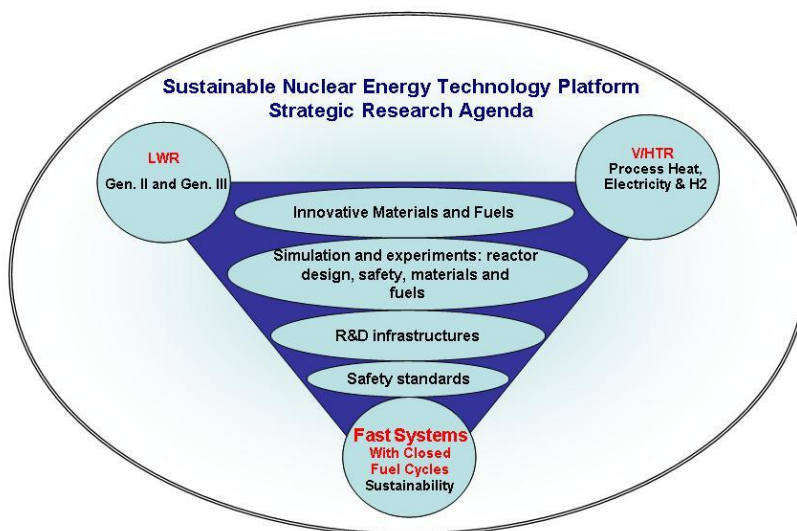
Idag ökar forskningen i Sverige efter decennier av ett vikande elevunderlag på de tekniska högskolorna och därmed också på forskarstuderande. FoU bedrivs idag på KTH, Chalmers och på Uppsala Universitet. Kraftbranschens deltagande i FoU kanaliseras genom SKC, Svensk Kärntekniskt Centrum. Kraftbolagen går också direkt in och stöttar examensarbeten och, i vissa fall, doktorander. Vattenfall finansierar också två stycken adjungerade professorer.

Den svaga ökningen av FoU bedöms dock som otillräcklig om ny kärnkraft skall byggas ut i Sverige och knappast ens tillräckligt för att ersätta den kompetens som är på väg att gå i pension. Just kompetensfrågan anses av kraftbranschen vara en synnerligen viktig fråga. Vilken utveckling som sker inom forskningsområdet kommer att vara avhängigt av politiska beslut om kärnkraftens framtid.

Utanför Europa pågår stora FoU-program ibland annat USA, Kina, Korea, Japan, Indien med flera länder. Denna verksamhet tas ej upp i denna rapport men man bör vara medveten om att merparten av forskningsinsatserna ligger utanför EU.

8 Framtida uthålligt kärnkraftssamhälle

Inom SNETP så kommer man att ta fram en så kallad "Strategic Agenda" vars syfte är att se vilka forskningsinsatser som behövs för att nå ett uthålligt kärnkraftssamhälle [10]. Se figur 10. Detta arbete är bara påbörjat och något slutdokument finns därför ej framme. Det som är tydligt är att man planerar för en framtid med ett uthålligt kärnkraftssystem där de nuvarande och tillkommande lättvattenreaktorerna kommer att finnas sida vid sida med snabbreaktorer. Detta möjliggör en slutning av bränslecykeln då upparbetning också skall tillämpas. En intressant aspekt är också att man vill integrera kärnkraft mot andra tillämpningar än enbart elproduktion, t ex processvärme och vätgasgenerering.

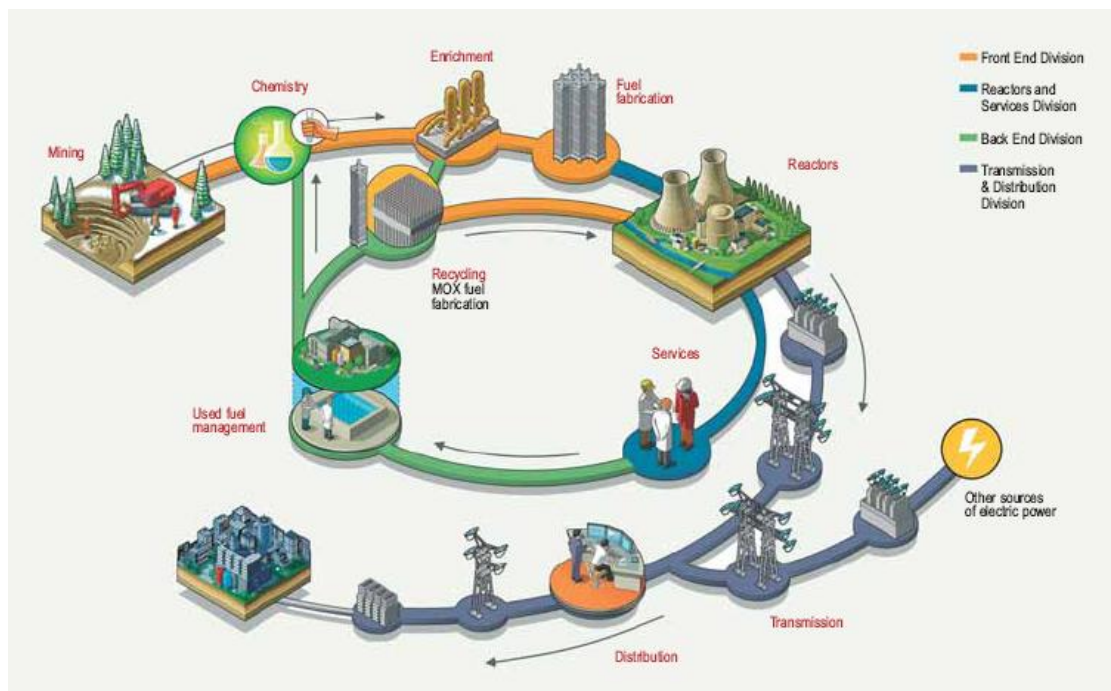


Figur 10. Strategic Research Agenda inom SNETP

Vid arbetet har man identifierat vissa nyckelområden som finns med i figur 10. Här återfinns vi behoven av materialforskning och utveckling av bränsle, säkerhetsarbete mellan nationsgränser, beräkningsmetoder samt infrastruktursatsningar av typen Jules Horowitz reaktor.

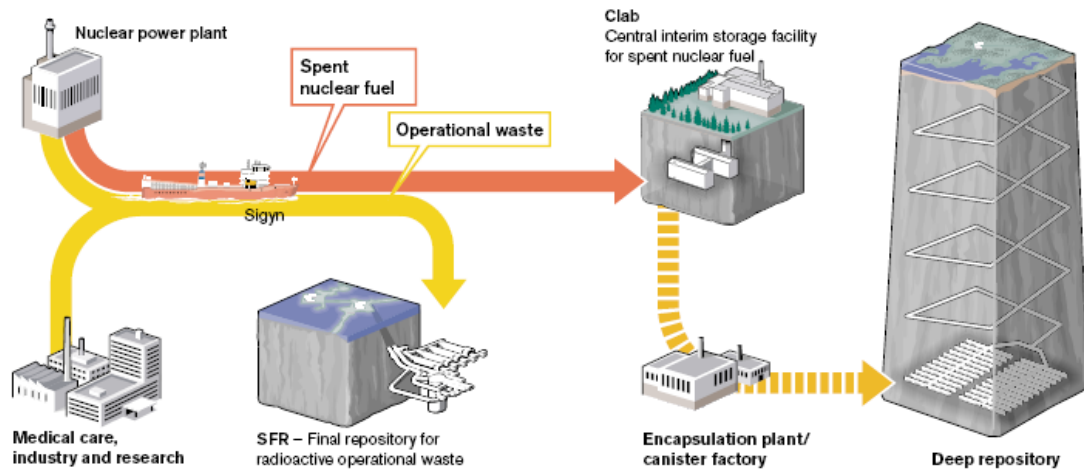
En viktig beståndsdel i ett framtida uthålligt kärnkraftssamhälle är upparbetning och slutning av bränslecykeln. Upparbetning innebär det använda bränslet genomgår en process där fissionsprodukterna separeras

från de klyvbara ämnena. Använt kärnbränsle innehåller såväl plutonium som uran som kan återanvändas i så kallat MOX-bränsle. Detta görs redan idag i fyra länder, Frankrike, Storbritannien, Ryssland och Japan. Den största upparbetningsanläggningen finns i La Hague, Frankrike. Plutonet och uranet skickas sedan till en bränslefabrik i södra Frankrike där MOX-bränsle tillverkas. Figur 11 visar bränslecykeln som den ser ut idag i Frankrike.



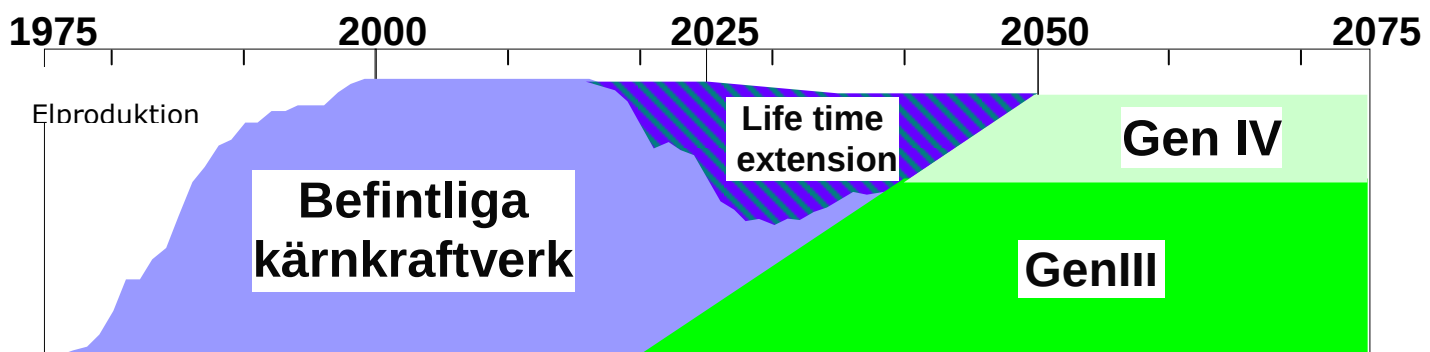
Figur 11. Komplet bränslecykel med upparbetning.

I ett uthålligt kärnkraftssamhälle så spelar förutom upparbetningen snabba reaktorer (bräddreaktorer) en viktig roll. Med dem kan man få en slutning av bränslecykeln. Här passar satsningen på Gen IV bra in då de flesta av dessa reaktorkoncept är snabbreaktorer. Med dessa kan man också hantera transuranerna och på så sätt få en möjlighet att minska mängden av de mest långlivade radioaktiva ämnena i slutförvaret. I Sverige har aldrig snabbreaktorer eller upparbetning varit aktuellt i kommersiell skala. Sverige har valt den metod som innebär att avfallet skall lagras i ett slutförvar 500 meter under ytan. Se figur 12. Det är också denna modell som Finland valt.



Figur 12. KBS-3, den svenska modellen för slutförvaring av använt kärnbränsle.

I Frankrike har man utarbetat en vision som bygger på en mix mellan vanliga lättvattenreaktorer, upparbetning, MOX-bränsle och snabbreaktorer. Figur 13 visar hur detta skall ske med en utfasning av Gen II och en infasning av Gen III. Till detta så kommer så småningom Gen IV reaktorer att sluta bränslecykeln. Inget annat land inom EU har så långt gångna planer på att sluta bränslecykeln och därmed erhålla ett uthålligt kärnkraftssamhälle. Om detta skulle genomföras finns alltså möjligheten att få en bränsletillgång på klyvbart material genom bridning av U-238 vilket medför att urantillgångarna sträcker långt bortom det hundralet år man pratar om i vanliga fall.



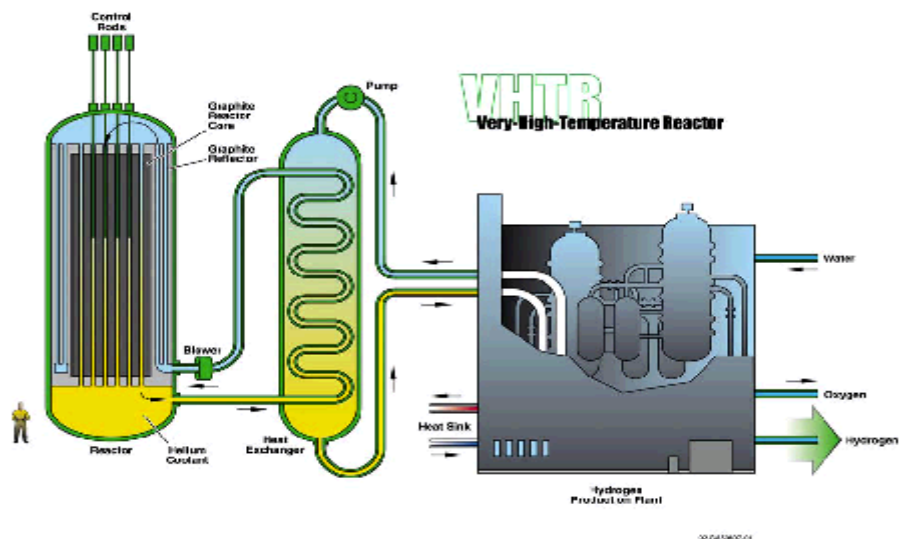
Figur 13. Infasning av ny kärnkraft i Frankrike.

I en inte alltför avlägsen framtid finns olika kopplingar mellan kärnkraft och annan infrastruktur som behöver utvecklas. Den utveckling som kanske ligger

närmast i tiden är att utnyttja kärnkraft för storskalig produktion av dricksvatten. Under det senaste året har Frankrikes president tillsammans med representanter från industrin åkt runt till ett flertal länder i Medelhavsregionen och Mellanöstern. Förutom ett förväntat ökat elbehov så ligger det också i deras intresse att möta ett stort behov av vatten för att försörja befolkning, industri och jordbruk. Detta behöver nödvändigtvis inte genomföras som en del av ett snabbreaktorprogram, även andra reaktorer kan komma i fråga för avsaltning.

En annan applikation som låtit tala om sig är möjligheten att använda kärnkraft för att ta upp oljesand ur marken. Det finns stora mängder av oljesand i delar av Nordamerika som idag inte utnyttjas i nämnvärd omfattning. Med allt högre oljepriser ökar intresset för att exploatera denna resurs och ett av de sätt som diskuteras är att använda kärnkraft som energikälla vid exploateringen.

Ett mer omtalat intresse i västvärlden är möjligheten att producera vätgas som kan användas som energibärare i ett framtida vätgassamhälle. I denna vision ingår bland annat en fullt utvecklad transportsektor med bränslecellsbilar och vätgasmackar. I SNETP och i GIF så finns denna vision klart uttalad och det knyts stora förhoppningar att några av GenIV-koncepten kan klara av detta med bra prestanda. I det amerikanska DOE-stödda programmet så tittar man framför allt VHTR med en speciellt utvecklad teknik för att producera vätgas. Se figur 14. Detta futuristiska alternativ kräver dock stora infrastrukturella insatser inom flera teknikområden, bland annat måste bränsleceller för transportsektorn bli en kommersiellt helt mogen process.



Figur 14. VHTR tillsammans med vätgasproduktion

I USA har man lanserat GNEP, Global Nuclear Energy Partnership. Den bärande tanken med GNEP är att kunna sprida kärnkraftens goda egenskaper

(god ekonomi, liten miljöpåverkan, etc) samtidigt som man kontrollerar kedjan med klyvbart material genom ett speciellt avtal där ett fåtal länder står för det mesta av hanteringen av bränslet. Detta skulle närmast kunna liknas vid ett leasingavtal som skulle göra det lättare för nya kärnkraftsländer. All hantering med brytning, anrikning, bränsletillverkning, upparbetning, bridreaktorer etc skulle ligga i ett fåtal länder (i princip dagens kärnvapenmakter) och de andra länderna skulle bara driva lättvattenreaktorer med hög inherent säkerhet. En särskilt anpassad reaktortyp kallad IRIS har tagits fram som ett lämpligt reaktorkoncept. IRIS är en PWR på 335 MWe som anses vara en bra storlek med hänsyn taget till reaktorsäkerhet och infasning mot befintliga energisystem. I Europa är det mest östeuropeiska länder som har skrivit på GNEP, men även länder som Italien, Frankrike och Storbritannien.

IAEA har en motsvarande lösning inom INPRO. Tanken här är att göra bränslehanteringen mer regional och låta IAEA ta ett större ansvar över kontrollen av anläggningarna. På så sätt så minskar man det eventuella godtycke som kärnvapenländerna skulle kunna visa.

Ett reaktorkoncept som får en viss massmedial uppmärksamhet är det som benämns ADS, Acceleratordrivna system. Det mest omskrivna ADS-konceptet är den så kallade Rubbiareaktorn (namngiven efter nobelpristagaren Carlo Rubbia). ADS är en underkritisk reaktor där neutronerna som behövs till kärnreaktionerna kommer från en extern neutronkälla. Då ADS-reaktorn är underkritisk så erhålls en mycket säker lösning ur reaktorsäkerhetssynpunkt då kedjereaktionerna avstannar när den externa neutronkällan stängs av. Den stora fördelen med ADS är att man kan bränna ut transuraner som ej kan hanteras lika lätt i en vanlig snabbreaktor. Speciellt besvärligt ur säkerhetssynpunkt är americium, som bildas genom neutroninfångning i vanliga reaktorer, som i en ADS kan transmutteras och därigenom så minskas mängden långlivat radioaktivt avfall.

Forskning och utveckling inom ADS bedrivs på ett flertal ställen i världen med syftet att få en säker metod att minska mängden transuraner. Kostnaderna för en ADS-anläggning uppskattas till mycket höga vilket medför att ADS mer skall ses som en pusselbit i ett långsiktigt uthålligt kärnkraftssystem. ADS bedöms inte som tekniskt utvecklat inom det tidsspann, fram till ca 2025, som rapporten omfattar.

9 Referenser

1. Invigningstal Sustainable Nuclear Energy Technology Platform. Bryssel. 20070921.
2. Lefvert T.: "Nuclear Power – its global status and future development" Elforsk report 07:19. March 2006.
3. Wik A.: "Kärnkraft, tredje vägen klarar tredje vägen?" Energitinget 2007.
4. Svensk Energi.: "svenskenergi.nu" Februari 2008, nummer 2.
5. Hansson H., Larsson S-E., Nyström O., Ridell .: "El från nya anläggningar 2007". Elforsk rapport 07:50.
6. Greisz J.: "Kärnkraft i Sverige – Vattenfalls investeringsplaner". Nuclear Power Day KTH 071016. 2007.
7. Tarjanne R., Rissanen S.: "Nuclear Power: Least-Cost Option for Baseload Electricity in Finland" Uranium Institute 25th Annual Symposium. 2000.
8. POWER vol.151 No 4, pp 32-39. April 2007.
9. Sarparanta K.: "Finland bygger generation III". Energitinget 2008.
10. "The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform: A vision report" ISBN 978-9279-05591-1. European Communities. 2007.
11. POWER vol.151 No 4, pp 40-50. April 2007.
12. "Life Cycle Assessment Vattenfall 's electricity in Sweden". www.vattenfall.com
13. "Nuclear energy of the future: what research for which objectives?" CEA. Paris. 2006.
14. Generation IV International Forum. www.gen-4.org